

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04242

研究課題名（和文）マルチマテリアル化に対応したCFRPと金属材料とのリベット接合技術の開発

研究課題名（英文）Development of riveting technique for CFRP and metal materials applicable to multi-material structures

研究代表者

海津 浩一（Kaizu, Koichi）

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：50177317

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：輸送機器の軽量化のために、軽量で高強度のCFRPと軽量の金属材料とを併用するマルチマテリアル構造が必要とされている。マルチマテリアル構造を製造するためにはCFRPと金属材料との異種材接合技術が不可欠である。本研究では、研究代表者らが開発した打抜きリベット締結法（パンチングリベット法）をCFRPとアルミニウム合金の接合に適用できるように発展させた。研究成果として、打抜きリベット締結法によりCFRPとアルミニウム合金を高い強度で接合できることを明らかにした。打抜きリベット締結法はCFRPとアルミニウム合金の接合に有用である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接合した継手が高い強度を得られることから打抜きリベット締結法がCFRPと金属材料との異種材料間の接合技術の一つとして有用であることを明らかにすることができた。現状では、リベットやリベットホルダーの形状が軽量化も考慮した最適な形状といえるところまでは至っていないが、強度に関係しない部分をスリム化することで、自動車や航空機などの輸送機器へ適用できる接合技術となりえるものと考えている。スリム化したリベットやリベットホルダーの最適形状を明らかにできれば、輸送機器の軽量化に伴う燃費向上によるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の削減に貢献できることから大きな社会的意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to reduce the weight of transportation equipment, multi-material structures using both lightweight and high-strength CFRP and lightweight metal materials are required. Joining technique of dissimilar materials such as CFRP and metal materials is indispensable for manufacturing multi-material structures. In this study, we investigated the shape of the rivet and the method of applying load for making the rivet so that the punching rivet method proposed by the principal researcher could be applied to the joining of CFRP and aluminium alloy. From research results, we succeeded in joining CFRP and aluminium alloy with high strength by the punching rivet method. The punching rivet method is useful for joining CFRP and aluminium alloy.

研究分野：材料力学、衝撃工学

キーワード：CFRP/A6061継手 打抜きリベット締結法（パンチングリベット法） 異種材料接合技術 マルチマテリアル構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

CFRP は軽量で高い比強度を持つ優れた材料であるが、現状では、複雑な形状のものを CFRP のみで一体成型することはできない。そのため、産業界では、異なる機能を持つ CFRP と金属材料を組み合わせることで、それらの材料を適材適所で使用するマルチマテリアル化が進められている。特に、自動車などの輸送機器では、軽量化に伴う燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減をねらって、CFRP と金属材料との接合によるマルチマテリアル化が不可欠となっている。そのようなことから、CFRP と金属材料を接合する技術は、マルチマテリアル化を推進するために必要な基盤技術であり、経済産業省の「革新的新構造材料等技術開発」の中でもマルチマテリアル化に不可欠な革新的異材接合技術とされている。その技術開発は国の未来開発プロジェクトとなっている。

CFRP と金属の接合には、接着剤による接着、ボルト・ナットによる機械的接合、レーザ加熱による接合、摩擦熱を利用した摩擦重ね接合 (FLJ) などが用いられているが、それらの接合方法にはそれぞれに一長一短がある。そのような背景にあって、研究代表者は独自に開発した打抜きリベット締結法を発展させることにより、CFRP と金属材料の接合に対して有用なリベット接合技術が開発できると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者らの開発した特殊なリベット接合法である打抜きリベット締結法 (パンチングリベット法) を発展させることにより、新たな CFRP と金属材料とのリベット接合法を開発することである。

3. 研究の方法

本研究では、打抜きリベット締結法において、板に打ち込むリベット等の形状を検討し、実際に継手を作製し、接合部の観察と継手強度により継手の接合状態を評価した。また静的荷重により作製した継手において板の打抜き過程で発生する CFRP の損傷を抑制するために衝撃荷重を用いた板へのリベットの打込みを試みた。

4. 研究成果

(1) GFRP (短繊維強化複合材料) と A6061 アルミニウム合金との接合

まず、FRP 板とアルミニウム合金板が打抜きリベット締結法により良好に接合できるかどうかを明らかにするため、短繊維のガラス繊維を含有した GFRP 板と A6061 板の接合を試みた。リベットおよびリベットホルダーにはアルミニウム合金 A7075BE-T6 を用いた。被接合材となる板はアルミニウム合金 A6061P-T6 板と GFRP 板である。GFRP 板は強化繊維とマトリックス (母材) からなり、東レ製 ABS 樹脂トヨラック® 100G-30 のガラス繊維 (短繊維) を 30% 混合させた材料であり、射出成形機により作製した。リベットおよびリベットホルダーの形状と寸法を図 1 に示す。継手強度を高める目的でリベット軸の先端を広げられるように、リベット軸先端に穴を設け、リベットホルダーには C1.0 の面取り加工を施した。GFRP 板および A6061 板はともに板厚 2.0mm、50mm×100mm の形状とした。

打抜きリベット締結法の接合プロセスの概略図を図 2 に示す。

(I) 図 2 の (a) のように、下部ダイスにピン、リベットホルダーを挿入し、上側に A6061 板、下側に GFRP 板を重ねて置く。そして上部ダイスを被せ、上部のダイスの穴にリベット、パンチを挿入し、上下のダイスをボルトで固定する。

(II) 図 2 の (b) のように、パンチに荷重を加え、リベットを押し込むことで板が打抜かれる。

(III) 図 2 の (c) のように、板が打抜かれた後、リベット軸先端は板の打抜き片を介してピンに接触する。そのまま所定の荷重まで荷重を加え続けるとリベット軸先端が塑性変形し、リベットホルダーの面取り部に入り込み、さらにリベット軸自体が太ることで板がリベットとリベットホルダーにより接合される。

接合実験は、インストロン万能試験機を用いてリベットの押し込み速度を 10mm/min、押し込み荷重の上限値を 30kN とした。

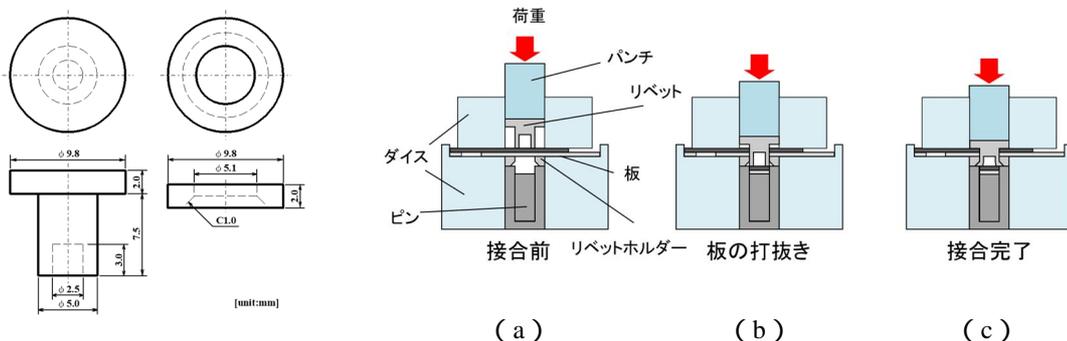


図 1 リベットとリベットホルダー 図 2 打抜きリベット締結法の接合プロセスの概略図

図3に継手の外観写真、図4に接合部の断面写真を示す。外観上、継手の面外変形や A6061 板（上側）および GFRP 板（下側）の割れは観察されず、打抜きリベット締結法によって A6061 板と GFRP 板の接合は可能であることがわかる。継手断面から、リベット軸が GFRP 板の部分で少し太っており、良好に接合されていることが分かる。

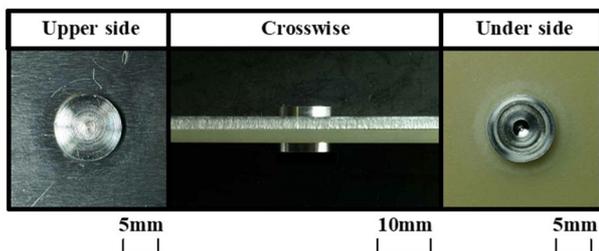


図3 作製した継手の外観写真

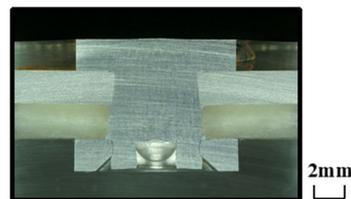


図4 接合部の断面写真

打抜きリベット締結法により作製した継手の接合部の穴の表面の写真を図5に示す。図5(a)は接合部の穴を正面から見た写真であり、(b)は(a)の GFRP の穴の表面部分の一部を拡大した写真である。図5(a)を見ると、A6061 板の上部は平滑であるが A6061 板下部および GFRP 板では凹凸のある表面になっている。図5(b)から、A6061 の打抜き片の側面が GFRP 板の穴の表面をこすったような筋が見え、また赤印で示した箇所に繊維が抜けたへこみのような黒い部分が見られた。

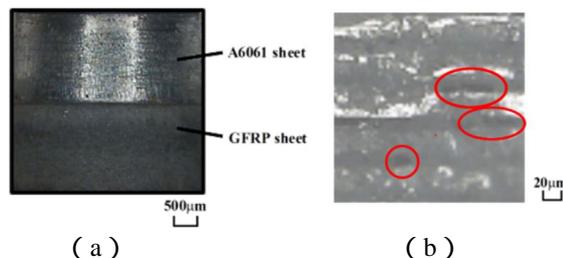


図5 接合部の打抜き穴の表面写真

打抜きリベット締結法によって接合を行う際に、図5の(a)と(b)のように、GFRP 板の打ち抜かれた穴の表面に凹凸があることが明らかとなった。このような穴の表面状態が継手強度にどの程度影響しているのかを調べるため、事前にドリルで穴あけ加工を施した A6061 板と GFRP 板を打抜きリベット締結法と同様の方法で接合した継手（リベット継手）との継手強度の比較を行った。リベット継手はドリルで穴あけ加工したため平滑な穴表面を持つ。打抜きリベット継手、リベット継手の最大引張荷重をプロットした継手強度の結果を図6に示す。さらに、ボルト・ナット接合した継手（ボルト継手）の強度も比較のために示している。継手強度はすべての継手でほぼ同じ値であった。打抜きリベット継手もリベット継手のどちらもリベット頭部とリベットホルダーにより板を締め付け、接合部の穴の縁からき裂が進展することを抑制する効果があると考えられる。そのため、打抜きリベット継手とリベット継手の穴の表面性状の差ぐらいであれば座面圧力の効果により、両者の強度に差が生じなかったと考えられる。また、打抜きリベット締結法により作製した継手はボルト・ナットにより接合した継手と同じ強度を得ることができた。

打抜きリベット締結法の実用化のために疲労寿命も調べた。疲労試験に用いる打抜きリベット継手は、板の積層の順序を A6061 板が上、GFRP 板を下とし、押し込み速度 10mm/min、押し込み荷重 30kN で作製した。比較のため、ボルト継手の疲労試験も行った。疲労試験機は、油圧サーボ式疲労試験機を用い、最大荷重に対する最小荷重の応力比は 0.1 とし、引張片振りの正弦波荷重を強度試験と同じ方向に加え、試験周波数を 10Hz とした。図7に疲労試験から得られた最大荷重と繰り返し数の関係（疲労寿命）を示す。打抜きリベット締結法により作製した継手の疲労寿命が長いことがわかる。これは疲労試験中にボルト継手のボルトが緩んだが、打抜きリベットはほとんど緩まないためである。

以上のことより、打抜きリベット締結法は GFRP 板と A6061 板の接合に適用でき、得られた継手はボルト・ナット接合と同等の強度があり、緩みにくいために疲労寿命も長くなるという特性を持つことが明らかになった。また、リベット軸で板を打抜く場合に打抜き穴の表面には凹凸があるが、リベット頭部とリベットホルダーで板を締め付けるため打抜き穴の表面の凹凸は継

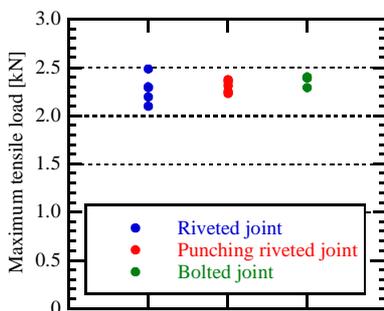


図6 継手強度の比較

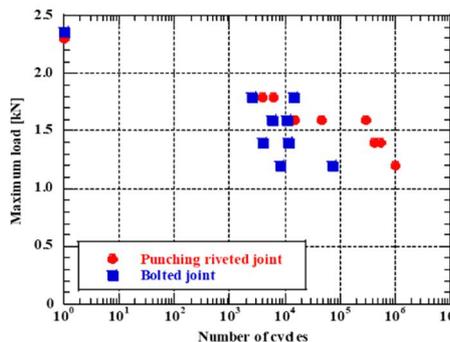


図7 疲労寿命

手強度や疲労寿命に影響しないことが明らかになった。GFRP 板と A6061 板の接合に打抜きリベット締結法は有用であると言える。

(2) CFRP（炭素繊維強化複合材料）と A6061 アルミニウム合金との接合

静的荷重を用いて継手を作製すると打抜き穴周辺の CFRP が損傷した。これは静的荷重で板を打ち抜くと板がたわんだ状態で打抜きが行われるためであると考えられる。その対策として、衝撃荷重で板がたわむ前に打ち抜くことをねらって落錘式の衝撃試験機を用いてリベットを CFRP 板と A6061 板に打ち込むことにより継手の作製を行った。衝撃試験では図 2 の静的荷重の代わりに、自由落下した錘をパンチに衝突させてリベットに衝撃荷重を作用させた。その結果、衝撃荷重を用いて作製した継手の継手強度は低下し、打抜き穴の周辺で CFRP 板のだれが大きくなることが確認された。この継手強度の低下と CFRP 板のだれを改善するために、新たにリベット支えと呼ぶ部品を導入した。図 8 にリベット、リベットホルダー、リベット支えの形状と寸法を示す。リベット軸先端部に傾斜をつけ、リベット支えを用いてリベット軸先端部を外側に変形させ、さらにリベットホルダーにも面取りを行うことでリベット軸先端を外側に変形させ、リベットホルダーの面取り部分に入り込ませることで、リベット頭部とリベットホルダーによる座面圧力を高めて継手強度の向上を図った。リベットおよびリベットホルダーには A7075BE-T6、リベット支えには SKD11 を用いた。板材には、厚さ 1.0 mm、25 mm×70 mm の寸法の CFRP および A6061P-T6 を用いた。CFRP 板の積層構成は[0/90/90/0]_s の 4 層構造であり、板の長手方向が 0° 層、0° 層に垂直な方向が 90° 層となっている。強化繊維は PAN 系炭素繊維 TR50、マトリックスはエポキシ樹脂である。

衝撃荷重を用いた打抜きリベット締結法の接合プロセスの概略図を図 9 に示す。質量 12.82kg の錘を高さ 400mm から自由落下させ、パンチに衝突後、リベット軸先端に取り付けたリベット支えが板を打抜き、その際に生じた打抜き片を介してリベット支えがダイに挿入したピンに衝突することで、リベット軸先端が広がってリベットホルダーと一体となり、さらにリベット軸が太くなることで締結が行われる。

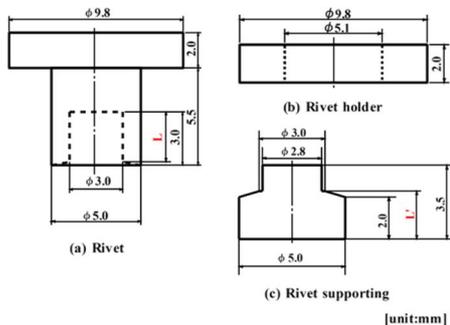


図 8 リベット、リベットホルダー、リベット支え

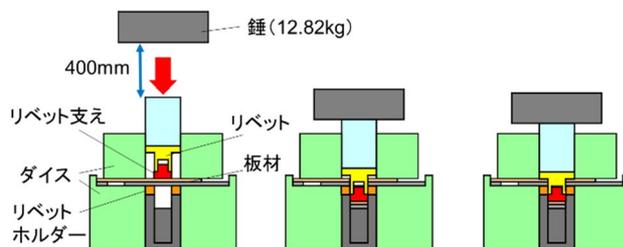


図 9 衝撃荷重を用いた打抜きリベット締結法の接合プロセスの概略図

リベット支えはリベット先端を開かせて継手強度を改善することを目的としているため、図 8(a)の L を変えることでリベット軸先端の傾斜角度を変えて継手強度を調べた。継手の引張試験により得られた最大引張荷重を継手強度とした結果を図 10 に示す。図 10 より、L=2.9mm の場合に静的荷重で作製した継手とほぼ同等の継手強度が得られた。

リベット先端の傾斜角度を変えることで継手強度は改善したが、まだ不十分なため衝撃荷重を 2 回加えることで継手強度を向上できるかを調べた。衝撃荷重で継手を作製すると、錘がパンチに衝突後バウンドし、締結時の押し込み荷重が不足してしまうと考え、板の打抜き完了後にもう一度衝撃荷重を加えることで不足する押し込み荷重を補えると考えた。リベット等は図 8 において、L=2.9mm、L'=1.1mm のものを用いた。これは図 10 の結果から、継手強度が高く、ばらつきが小さいことから選んだ。錘の落下高さは 1 回目と 2 回目がともに 300mm から（以後 300mm-300mm 継手）、1 回目と 2 回目がともに 400mm から（以後 400mm-400mm 継手）、1 回目は 400mm、2 回目は 200mm から（以後 400mm-200mm 継手）、それぞれ錘を落下させて 3 種類の継手を作製した。さらに、1 回だけ 400mm から錘を落下させた継手（以後 400mm 継手）との比較も行った。なお接合部の断面観察より 300mm-300mm 継手と 400mm-400mm 継手のどちらの場合もリベット頭部の下部の角部が片当たりすることにより CFRP 板の上部にひび割れが見られた。継手の引張試験により得られた最大引張荷重を継手強度とした結果を図 11 に示す。図より、300mm-300mm 継手の継手強度は低く、その他の継手の強度はほぼ同じであるが、2 回衝撃荷重を加えた継手は強度のばらつきが大きくなった。また 400mm-200mm 継手について、2 回目の錘の落下高さが 200mm では、1 回目に 400mm からの衝撃荷重を受けて塑性変形したリベットをもう一度変形させるに

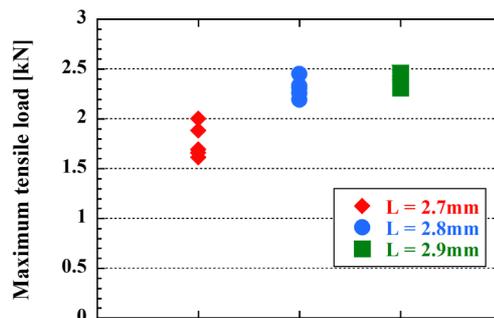


図 10 リベット軸先端角度と継手強度

は衝撃荷重が不足したと考えられる。400mm-400mm 継手は強度の最大値がわずかに高いものがあることから、2 回目の錘の落下高さを上げることで継手強度が向上する可能性がある。そこで、リベット頭部の形状を図 12 のように改良し、さらに 1 回目の衝撃荷重は板を打ち抜ける程度に低くすることでリベット頭部の下部の片当たりによる CFRP 板の上部の割れを抑え、2 回目の高い衝撃荷重でリベット軸を変形させて板の接合を行うようにした。

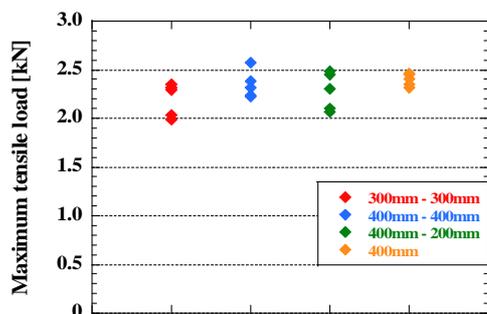


図 11 衝撃荷重を 2 回加えて作製した継手の継手強度

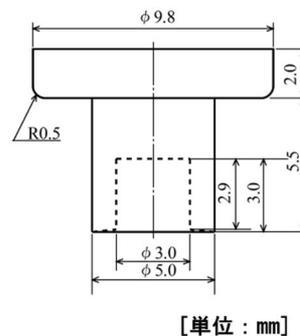


図 12 改良したリベット

図 12 のリベットを用いて、1 回目が 200mm、2 回目が 400mm から（以後 200mm-400mm 継手）、1 回目が 200mm、2 回目が 500mm から（以後 200mm-500mm 継手）、1 回目が 200mm、2 回目が 600mm から（以後 200mm-600mm 継手）それぞれ錘を落下させた 3 種類の継手を作製した、さらに、図 12 のリベット頭部の下部に R 加工をしたリベットを用いて錘を 400mm から 1 回だけ落下させた 400mm 継手と 図 8 の R 加工をしていないリベットを用いて錘を 400mm から 1 回だけ落下させた 400mm(R0)継手、図 12 のリベットを用いて錘を 500mm から 1 回だけ落下させた 500mm 継手、図 11 で継手強度が高いものがあった 400mm-400mm 継手と同じ落下高さの条件で図 12 のリベットを用いた 400mm-400mm 継手も作製した。それらの継手強度の結果を図 13 に示す。図 12 のリベットを用いることで 400mm-400mm 継手の強度は 1 回だけ錘を落下させた継手の強度とほぼ同じであった。また衝撃荷重を 2 回加えると 1 回の衝撃荷重で継手を作製する場合と同じ程度の CFRP 板の損傷が生じたが、継手強度は 1 回の衝撃荷重のみで作製した継手よりわずかに高くなり、静的荷重で作製した継手とほぼ同じであった。衝撃荷重を 2 回に分ける方法は継手強度を向上させるには有効である。

衝撃荷重を 2 回加えることで静的荷重で作製した継手と同程度の高い継手強度を得ることができたことから、衝撃荷重を用いることで作業効率を上げることができる。さらに、衝撃荷重を 2 回加えて作製した継手では静的荷重で作製した継手よりも CFRP 板の損傷がやや大きくなったが、ほぼ同じ継手強度が得られた。したがって、リベットとリベットホルダーによる高い座面圧力は CFRP 板の損傷からの破壊を抑制する効果があり、打抜きリベット締結法で生じる CFRP 板の損傷程度では、損傷の大小が継手の強度に影響しないと考えられ、打抜きリベット締結法は CFRP 板と金属板の接合に有用な接合方法だと言うことができる。

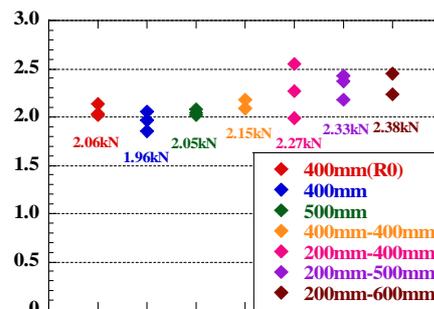


図 13 改良したリベットを用いて衝撃荷重を 2 回加えて作製した継手の継手強度

< 引用文献 >

「革新的新構造材料等技術開発」の概要 経済産業省産業技術環境局研究開発課、
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu108/>
 木之下広幸、池田清彦、海津浩一、小林太一、パンチングリベット法による冷間圧延鋼板の締結、日本機械学会論文集 C 編、77 巻 780 号、pp.3184-3192 (2011)
 伊藤脩平、海津浩一、日下正広、木村真晃、異種材継手の作製と継手強度の検討、日本機械学会、M&M2017 材料力学カンファレンス講演論文集、Vol.2017、PS14 (2017)
 海津浩一、本岡拓也、日下正広、木村真晃、平井三友、パンチングリベット法により作製した GFRP / A6061 継手の継手強度、日本機械学会論文集、88 巻 907 号 p. 21-00313 (2022)
 西上寛人、海津浩一、日下正広、木村真晃、衝撃荷重を利用した打抜きリベット締結法による CFRP/A6061 継手の作製と継手、日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス講演論文集、Vol.2021、GS09 (2021)
 海津浩一、日下正広、木村真晃、CFRP 薄板と A6061 薄板の衝撃荷重を用いた打抜きリベット締結、日本塑性加工学会塑性加工連合講演会講演論文集、Vol.73、pp.297-298 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 海津浩一、本岡拓也、日下正広、木村真晃、平井三友	4. 巻 88 巻
2. 論文標題 パンチングリベット法により作製したGFRP / A6061継手の継手強度	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p. 21-00313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西上 寛人、海津 浩一、日下 正広、木村 真晃
2. 発表標題 衝撃荷重を用いて打抜きリベット締結した CFRP/A6061継手の締結強度の検討
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西上 寛人、海津 浩一、日下 正広、木村 真晃
2. 発表標題 衝撃荷重を利用した打抜きリベット締結法によるCFRP/A6061 継手の作製と継手強度
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海津浩一、日下正広、木村真晃
2. 発表標題 CFRP薄板とA6061薄板の衝撃荷重を用いた打抜きリベット締結
3. 学会等名 日本塑性加工学会塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------